تأثیر شکل منبع تخلیه بر مشخصات جریان در تخلیهٔ سطحی پساب‌های با شناوری منفی★

فاطمه شاچری(۱) ندا شیخ رضازاده نیکو(۲) محسن سعیدی(۳) جمال محمدولی سامانی(٤) احمد شاچری(٥)

چکیده ***در این مقاله*** *نتایج آزمایشگاهی تأثیر شکل منبع تخلیه‌کننده بر تخلیهٔ سطحی پساب‌های با شناوری منفی در محیطی ساکن و همگن برای دو مقطع مستطیل و ذوزنقه (مقطع هیدرولیکی بهینه) ارائه شده است. آزمایش‌ها در اتاق تاریک ثبت و با تحلیل رقومی پردازش شده است. رفتار جریان چگال برای عدد فرود دنسیمتریک کمتر از بیست گزارش شده است. بنابراین، خاصیت خود-همسانی جریان در این آزمایش‌ها برقرار نیست. پارامترهای مورد بررسی شامل الگوی جریان، پروفیل غلظت، تغییر عرض و مسیر حرکت جریان می‌باشند. نتایج بررسی رفتار جریان در مقاطع نشان می‌دهد علی‌رغم الگوی رفتاری مشابه، مقطع ذوزنقه از مشخصات هندسی و اختلاطی بهتری نسبت به مقطع مستطیل برخوردار است.*

واژه‌های کلیدی تخلیهٔ سطحی، جریان چگال، شکل مقطع منبع تخلیه‌کننده، مشخصات جریان.

Effects of Discharges Source Section on Flow Characteristics of Negatively Buoyant Effluent

N.Sheikhrezadaeh N. Sheikhreza zadeh M.Saeedi J.Mohannadvali Samani A.Shacheri

Abstract *Results of a comprehensive experimental study on the impact of the outfall source shape on flow characteristics in surface discharge of negatively buoyant effluent in stagnant water were done on two sections of rectangular and trapezoidal (The optimal hydraulic cross section). These experiments were recorded in dark room and processed using digital analysis. Dense flow behavior was reported for Densimetric Froude number less than twenty so, the self-similarity property of flow is not established in these experiments. The parameters examined in this research include flow pattern, concentration profiles, change width and flow trajectory. The result of flow behavior in these sections indicates that despite similar behavioral pattern, geometric and mixing characteristics of trapezoid are better than rectangular.*

Key Words Dense flow, Discharges Source Cross Section, Flow Properties, Surface Discharge.

★ تاریخ دریافت مقاله ٩٤/٨/١٤ تاریخ پذیرش آن ٩٦/٧/٢٣ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانش‌آموختهٔ مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس. Email: F.shacheri@yahoo.com

(۲) دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) استاد گروه آب و محیط زیست، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

(٤) استاد گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس.

(٥) دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان.

مقدمه

در سال‌های اخیر افزایش جمعیت و صنعتی شدن جهان، کمبود شدید آب و کاهش هزینه‌های آب‌شیرین‌کن‌ها، سبب گردیده تا نمک‌زدایی به روشی ماندگار و بادوام برای تأمین آب شرب به‌منظور تضمین منابع آب در بسیاری از مناطق ازجمله امارات متحده عربی, عربستان سعودی، عمان، ایالات متحدهٔ امریکا، اسپانیا و استرالیا تبدیل شود [1]. تعداد و سایز نیروگاه‌های آب‌شیرین‌کن در حال بهره‌برداری و یا برنامه‌ریزی‌شده در شهرهای بزرگ ساحلی در سراسر جهان به‌طور چشم‌گیری در طول دههٔ گذشته افزایش یافته است [2,3]. این امر منجر به افزایش نگرانی‌ها دررابطه با اثرات زیست‌محیطی این نیروگاه‌ها در بلندمدت بیش از پیش شده است [4]. نمک‌زدایی می‌تواند منجر به تأثیرات بالقوهٔ زیست‌محیطی ازجمله آلودگی در پیرامون محل کارخانه، دفع نمک، ملاحظات انرژی، دفع مواد شیمیایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر و همچنین اثرات دیگر (نظیر آلودگی صوتی) شود [5].

سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (Environmental Protection Agency) و اروپا به‌منظور به حداقل رساندن خسارت‌ها و پیامدهای زیست‌محیطی فاضلاب بر محیط زیست، تخلیهٔ فاضلاب به دریا را تنها به شرط ارضای استانداردهای سختگیرانهٔ حاکم بر کیفیت آب در محیط‌پذیرنده مجاز دانسته‌اند [8-6]. به‌طور معمول پخش فاضلاب در محیط‌پذیرنده از طریق تخلیه‌کننده‌ها (Outfalls) صورت می‌گیرد [9]. اساس و مبنای عمل در این سیستم، رقیق‌سازی فاضلاب می‌باشد، به‌طوری‌که فاضلاب رقیق‌شده، مشکلاتی را برای محیط زیست منطقه ایجاد نکند.

آب شور به‌سبب چگال‌تر بودن تمایل دارد به‌سمت بستر دریا برود و این منجر به تأثیرات زیست‌محیطی نامطلوب برای جوامع اعماق دریا می‌شود. به‌منظور کاهش این اثرات، تخلیه‌کنندهٔ آب شور باید به‌درستی طراحی شود به‌طوری‌که تخلیه به‌سرعت بتواند داخل منطقهٔ نظارتی تعیین‌شده مخلوط گردد [10].

تخلیهٔ پساب به محیط‌پذیرنده به دو صورت سطحی و مستغرق انجام می‌شود. علی‌رغم این‌که تخلیه‌کننده‌های مستغرق دارای بازده بالاتر و البته متداول‌تر هستند ولی تخلیه‌کننده‌های سطحی به‌منظور تخلیهٔ پساب ناشی از نیروگاه‌های نمک‌زدایی که رقت نهایی مورد نیازشان کوچک است، مورد توجه مهندسان محیط زیست قرار گرفته است. تخلیهٔ سطحی یک گزینهٔ معمول برای دفع پساب به دریا است (که به‌طور معمول توسط یک کانال روباز، پساب را در سطح آب‌پذیرنده منتشر می‌کند [11].

عمدهٔ مطالعات آزمایشگاهی پیشین انواع تنظیمات تخلیه، به‌عنوان مثال تخلیهٔ مستغرق عمودی و تخلیهٔ چگال مایل توسط شائو و لاو [10]، باینس و همکاران [12]، بلینگر و ژیرکا [13] ، سیپولینا و همکاران [14]، ژیرکا [15]، کیکرت [16]، مک للان و رندال [17]، رابرت و همکاران [18]، الیور و همکاران [19] و ژانگ و همکاران[20] انجام شده است. اکثر این مطالعات بر تعیین ویژگی‌های جریان در محیط ساکن متمرکز است.

مطالعهٔ علمی تنظیمات تخلیه با شناوری مثبت نسبت به تخلیه با شناوری منفی دارای سابقه‌ای نسبتا طولانی است [21]. مطالعات انجام‌شده در این زمینه شامل تعیین مشخصات جریان، بررسی رفتار اختلاطی جت‌های سطحی با شناوری مثبت در محیط ساکن و متحرک و طبقه‌بندی جریان می‌باشد، در این مطالعات تأثیر شرایط کم‌عمقی پیکرهٔ آب‌پذیرنده نیز درنظر گرفته شده است[25-22 ,11] . مطالعات اندکی دررابطه با جریان‌هایی با شناوری خنثی و منفی وجود دارد [26-29]. درمورد تخلیهٔ سطحی پساب‌های سنگین اطلاعات کافی مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی یا اندازه‌گیری‌های میدانی برای تحلیل رفتار این جریانات در دسترس نیست که این موضوع، منجر به تقریب بالا در مدل‌های

ریاضی گردیده و نیز طراحی علمی و بهره‌برداری مناسب از این تأسیسات را با مشکل مواجه کرده است. بنابراین استفاده از مدل فیزیکی برای مدل کردن تخلیهٔ سطحی پساب‌های سنگین امکان شناخت بهتر از پدیدهٔ مورد بررسی را میسر می‌سازد.

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینهٔ مدل‌سازی تخلیهٔ پساب را می‌توان به مطالعات آزمایشگاهی بر مبنای روش مقیاس طولی دیویدسون و همکاران [30]، ژیرکا [31]، رابرت و همکاران [18]، رابرت و همکاران-32] [34 و تیان و همکاران [35] و مطالعات عددی برمبنای روش اولری چون چو و گلدبرگ [36]، وود و همکاران [37]، و دیویدسون [38] و یا لاگرانژی چون لی و چانگ [39]، بامگارتنر و همکاران [40] غفاریان روح‌پرور و همکاران [٤١] می‌باشد.

مجموع مطالعات انجام‌گرفته بر روی تخلیه‌کننده‌های دریایی نهایتا منجر به توسعهٔ مدل‌های ریاضی متعدد نظیر مدل کرجت (CORJET)، جت‌لگ (JETLAG)، UM و کرمیکس (CORMIX) برای طراحی علمی و عملی این تأسیسات گشته است . از این نرم‌افزارها به‌منظور پیش‌بینی وضعیت جریان در ناحیهٔ میدان‌نزدیک جریان و طراحی هیدرولیکی انواع تخلیه‌کننده‌ها استفاده می‌گردد.

در زمینهٔ مطالعات اخیر برای تعیین رفتار جت‌های سطحی چگال در محیط ساکن می‌توان پژوهش‌های عابسی و همکاران را عنوان نمود [29]. ویژگی‌های اختلاطی و هندسی جریان از جمله پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق به‌شمار می‌رود. علی‌رغم اهمیت اثر شکل هندسی منبع در بررسی رفتار تخلیهٔ سطحی چگال در میدان‌نزدیک تاکنون هیچ مطالعه‌ای در این رابطه گزارش نشده است. پژوهشگران مختلفی دررابطه با اثر شکل هندسی منبع در تخلیهٔ سیالات تراکم‌پذیر مطالعاتی انجام داده‌اند. میلر و همکاران [42] دریافتند که مقاطع با گوشه‌های تیز نسبت به مقاطع دایره‌ای از ویژگی‌های اختلاط بهتری برخوردارند. در مطالعهٔ حاضر، به‌منظور بررسی اثر شکل مقطع بر تخلیهٔ سطحی پساب‌هایی با شناوری منفی در محیط ساکن از دو مقطع مستطیل و ذوزنقه استفاده شده است. برای دو مقطع مذکور، قطر معادل (D_e) یکسان درنظر گرفته شده است (مقاطع با قطر معادل یکسان متناظر است با دایره‌ای که مساحت معادل دارد).

در این پژوهش، باتوجه به عدم مطالعات جامع در زمینه ارزیابی تأثیر شکل منبع در تخلیهٔ سطحی پساب‌هایی با شناوری منفی از کانال‌های پیش‌رونده، از طریق انجام یک‌سری آزمایش‌ها در شرایط تخلیهٔ مختلف نسبت به بررسی رفتار جریان در محیط ساکن و لایه‌بندی‌نشده برای هریک از مقاطع و مقایسهٔ آنها با یکدیگر اقدام گردید. نتایج مشاهدات کمی به‌صورت نمودار و روابط بی‌بعد ارائه شد.

مواد و روش‌ها

بازهٔ تغییر متغیرها در این آزمایش‌ها متناسب با نمونه‌های واقعی انتخاب شده است تا نتایج آزمایشگاهی حاصل قابل استفاده در مقیاس واقعی باشند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها برای پیش‌بینی رفتار جریان مورد استفادهٔ مهندسان طراح قرار می‌گیرد. در جدول (١) محدودهٔ آزمایش‌ها برای پارامترهای جریان تخلیه‌شده، آب محیط و نسبت‌های محاسبه‌شده برای هر یک از مقاطع خلاصه شده است. این آزمایش‌ها در مدل آزمایشگاهی تحقیقات هیدرولیک محیط زیست دانشکدهٔ عمران دانشگاه علم و صنعت انجام گردید.

مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده مخزنی به‌طول ٦ متر، عرض ١/٨ متر و عمق ١/٥ متر می‌باشد. چارچوب فولادی این مخزن امتداد طولی آن را به سه پنجرهٔ ٢ متری تقسیم کرده است که به‌منظور مشاهدهٔ جریان از آن، از دو طرف با شیشه‌ای به ضخامت ٢٠ میلی‌متر

پوشانیده شده است. این مخزن از آب با چگالی ۰/۹۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب در دمای ۲۵–۲۳ درجهٔ سانتی‌گراد پر شده بود. هر یک از کانال‌های با مقاطع مستطیل و ذوزنقهٔ موجود در سطح آب مخزن به‌عنوان تخلیه‌کنندهٔ سطحی در این آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این تخلیه‌کننده‌ها، از طریق یک سیستم پمپاژ، فاضلاب مصنوعی تولیدشده را با سرعت‌های مختلف در داخل مخزن تخلیه می‌کردند. میزان دبی فاضلاب خروجی نیز از طریق دبی سنج الکترونیکی اندازه‌گیری شد. سپس، براساس عمق قرائت‌شده در دهانهٔ خروجی کانال، سرعت جریان محاسبه گردید. پساب مورد استفاده در این آزمایش‌ها، آب شور ناشی از انحلال نمک طعام (سدیم کلرید) در آب شیرین بود که جریانی از پساب در غلظت‌های مختلف با جرم‌های حجمی متفاوت ایجاد می‌نماید. به‌منظور تعیین مشخصات ظاهری پلوم در محیط پذیرنده، از رنگ محلول در آب به‌عنوان آشکارساز و ثبت مسیر حرکت در زمینه در سفید بااستفاده از دوربین دیجیتال سونی مدل DCR-SR47 استفاده شد. آزمایش‌ها از طریق ثبت دیجیتال مسیر حرکت جریان در اتاق تاریک در مقابل یک منبع نور سفید یکنواخت به‌طول ۲ و ارتفاع ۱/۳ متر متشکل از ۲۵ لامپ فلورسنت که در پشت مخزن جانمایی شده بود، انجام پذیرفت. به‌این‌ترتیب، امکان پردازش رقومی تصاویر دیجیتال برداشت شده به‌منظور تعیین مشخصات حرکت جریان فاضلاب در محیط به‌نحو مطلوب فراهم گردید. در این مطالعه، از روش تحلیل رقومی مشابه عابسی و همکاران [29] استفاده شده است. در این روش پس از استخراج فریم‌های ویدیوی ثبت‌شده از آزمایش‌ها، بااستفاده از نرم‌افزار ایمیج استریم (image stream 7.0) [43]، که توسط دکتر نوکز در دانشگاه کانتربوری نیوزیلند ابداع گردیده است، تصاویر میانگین‌گیری شد و یک تصویر مستقل از زمان به‌جهت انجام پردازش رقومی حاصل گردید.

تحلیل ابعادی

رفتار کلی یک جت سطحی عمدتا توسط فرایندهای صورت‌گرفته در ناحیهٔ میدان‌نزدیک (Near-Field) تعیین می‌شود. استفاده از تحلیل‌های ابعادی در این مطالعات، بر دو فرض اولیهٔ آشفتگی کامل جریان به‌منظور صرف‌نظر کردن از تأثیرات لزجت و فرض تقریب بوسینسک استوار است [44]. براین‌اساس، جونز و همکاران [45] مشخصات جریان خروجی در محدودهٔ میدان‌نزدیک محیط ساکن را تابع هشت متغیر تأثیرگذار شامل شار حجمی ($Q_0=U_0A_0$)، اندازهٔ حرکت ($M_0=Q_0U_0$)، شناوری ($B_0=Q_0g_0$)، فاصله از دهانهٔ تخلیه‌کننده (X)، عمق آب محیط (H)، عرض و عمق کانال تخلیه‌کننده (b_0,h_0) و زاویهٔ خروجی (θ_0) عنوان نموده‌اند. در روابط ارائه‌شده A_0 سطح مقطع جریان برحسب متر مربع، U_0 سرعت اولیهٔ جت خروجی از منبع برحسب متر بر ثانیه و g_0 شتاب ثقل کاهش‌یافته است که برابر است با $g'_0=g[(\rho_0-\rho_a)/\rho_a]$. مشخصات جریان ($\varphi$) را به‌صورت رابطهٔ (۱) به این متغیرها وابسته دانسته‌اند.

$$\varphi= f_1(Q_0, M_0, B_0, X, H, b_0, h_0, \theta_0) \qquad (۱)$$

در محیط‌های عمیق و در حالت تخلیه افقی ($\theta_0=0$) ، با صرف‌نظر کردن از متغیرهای وابسته (θ_0) مشخصات جریان را به‌صورت رابطهٔ (۲) می‌توان تابع شارهای اولیهٔ جریان خروجی (Q_0, M_0, B_0) فاصله از محل تخلیه (X) و مشخصات هندسی منبع عنوان نمود.

$$\varphi=f_2(Q_0, M_0, B_0, X, H, b_0, h_0) \qquad (۲)$$

باتوجه به فرایندهای پیچیدهٔ حاکم در این پدیده، استفاده از روش مقیاس طولی در مطالعهٔ تخلیه‌کننده‌های دریایی به‌عنوان روشی ساده و کارآمد همواره مورد توجه بوده است [2]. در این روش با ترکیب مقدار نسبی متغیرهای مرتبط با نیروهای مؤثر شرکت‌کننده در پدیدهٔ اختلاط، می‌توان این متغیرها را در گروه‌هایی با بعد طول تحت عنوان مقیاس طولی دسته‌بندی نمود.

مرحلهٔ اصلی از تحلیل آزمایش‌ها به‌روش مقیاس طولی، ارائهٔ روابط و نمودارهای بی‌بعد برای توصیف رفتار جریان از طریق این پارامترهای بی‌بعد است. این امر بااستفاده از شارهای اولیهٔ جریان و تئوری باکینگهام میسر می‌گردد. در اینجا می‌توان مشخصات جریان خروجی از طریق تجمیع در قالب مقیاس‌های طولی (L_Q, L_M) تأثیرگذار را به‌صورت رابطهٔ (۳) عنوان کرد:

$$\text{خصوصیات جت با بعد طول} = f_3(L_Q, L_M, X, H, b_0, h_0) \qquad (۳)$$

در این رابطه، $(L_Q = \frac{Q_0}{M_o^{1/2}})$ مقیاس طولی تخلیه، $(L_M = \frac{M_0^{3/4}}{B_o^{1/2}})$ مقیاس طولی جت به پلوم، (b_0) عرض کانال تخلیه‌کننده، (h_0) عمق کانال تخلیه‌کننده و X فاصله از محل تخلیه می‌باشد. در این رابطه تمام پارامترها از جمله مقیاس طولی تخلیه (L_Q)، مقیاس طولی جت به پلوم (L_M)، عمق کانال تخلیه (h_0) و فاصله از محل تخلیه (X) دارای بعد طول می‌باشند. مقیاس طولی تخلیه (L_Q) ناحیه‌ای را که در آن هندسهٔ کانال تخلیه، خصوصیات جریان را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، تعریف می‌کند و در واقع نشان‌دهندهٔ اهمیت نسبی شار حجمی اولیه به شار مومنتم اولیه است [46]. مقیاس طولی جت به پلوم (L_M) بیانگر فاصله‌ای است که در آن انتقال از ناحیهٔ غلبهٔ اندازهٔ حرکت (رفتار جت‌مانند جریان) به ناحیهٔ غلبهٔ شناوری (رفتار پلوم‌شکل جریان) در محیط‌های ساکن و همگن اتفاق می‌افتد. نسبت این دو مقیاس طولی، متناسب است با عدد فرود دنسیمتریک $(Fr_d = \frac{u_0}{\sqrt{g' A_0^{1/2}}} \propto \frac{L_M}{L_Q})$.

بنابراین، بااستفاده از آنالیز ابعادی، شکل بدون بعد پارامتر جریان (*φ) را می‌توان به‌صورت تابعی از نسبت‌های بدون بعد زیر توصیف کرد:

$$\varphi^* = f\left(\frac{L_Q}{L_M}, \frac{X}{L_M}, \frac{H}{L_M}, AR\right) \qquad (۴)$$

که در آن AR، نسبت شکل کانال تخلیه است که به‌صورت $(\frac{h_0}{b_0})$ تعریف شده است. رابرتز و همکاران [18] و بلنینگر و ژیرکا [13] در مطالعات خود به‌منظور توسعه گراف‌های بی‌بعد به‌منظور تعیین مشخصات هندسی حرکت جریان پارامتر بدون بعد $(\frac{X}{L_M})$ مورد استفاده قرار دادند. در این مطالعه نیز، $(\frac{X}{L_M})$ به‌عنوان پارامتر هندسی بدون بعد جت درنظر گرفته شد.

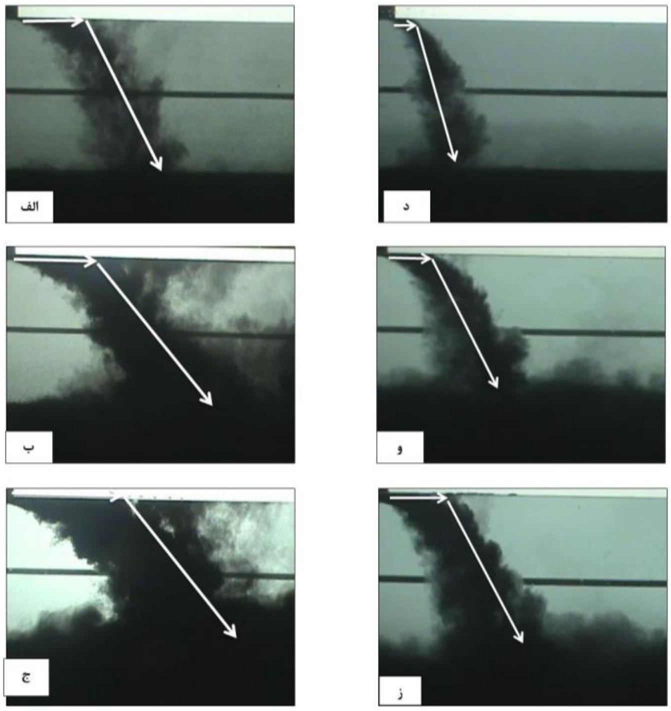
$$\frac{X}{L_M} = f_5\left(\frac{L_M}{L_Q}, \frac{h_0}{b_0}, \frac{H}{L_M}\right) \qquad (۵)$$

نتایج و بحث

در این مطالعه، پس از انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها درجهت بررسی تأثیر شکل منبع در تخلیهٔ سطحی پساب‌های با شناوری منفی از کانال‌های پیش‌رونده، درنهایت توسعهٔ مجموعه‌ای از نمودارهای بی‌بعد برای پیش‌بینی و مقایسهٔ الگوی جریان، پروفیل غلظت، تغییرات عرض و مسیر حرکت جریان مورد نظر قرار گرفت.

جدول ۱ محدودهٔ پارامترهای آزمایشگاهی برای جریان تخلیه‌شده و آب محیط

مقطع				مشخصات تخلیه			مشخصات آب‌پذیرنده			نسبت‌های محاسبه‌شده	
	L_Q (m)	T (ºC)	Fr_d	u_0 (m/s)	h_0 (m)	$\rho_0(\frac{kg}{m^3})$	u_a (m/s)	H_a (m)	$\rho_a(\frac{kg}{m^3})$	$\frac{H}{h_0}$	$\Delta\rho(\frac{kg}{m^3})$
مستطیل	۲/۸۳–۵/۳	۲۵–۲۳	۱/۷–٤/۹۳	۰/۲۱–۰/۳٦	۰/۰۲۵–۰/۰۰۸	۱۰۱۰–۱۰۵۳	۰	۰/٦۰۷–۰/٦۲۵	۹۹۸/۵–۹۹۸/۷	۲۰–۷۵/۸	۳۹/۵– ۸/۳
ذوزنقه	–۵/۷۱ ۲/۷۸	۲۵–۲۳	۱/۷–٤/۹۳	۰/۲۰–۰/۳۲	۰/۰۲٤–۰/۰۰۷	۱۰۱۰–۱۰۵۳	۰	۰/٦۰۷–۰/٦۲۵	۹۹۸/۵–۹۹۸/۷	۲۰–۸۷	۸/۳–۳۹/۵



شکل ۱ مسیر حرکت و موقعیت نقاط شیرجه و برخورد در تخلیهٔ سطحی فاضلاب سنگین از کانال‌های مستطیلی

الف) $u_0 = 23.2$ cm/s ، $\rho_0 = 1.014$ gr/cm^3 ب) $u_0 = 31.7$ cm/s , $\rho_0 = 1.014$ gr/cm^3

ج) $u_0 = 34.9$ cm/s , $\rho_0 = 1.014$ gr/cm^3 د) $u_0 = 23.6$ cm/s , $\rho_0 = 1.055$ gr/cm^3

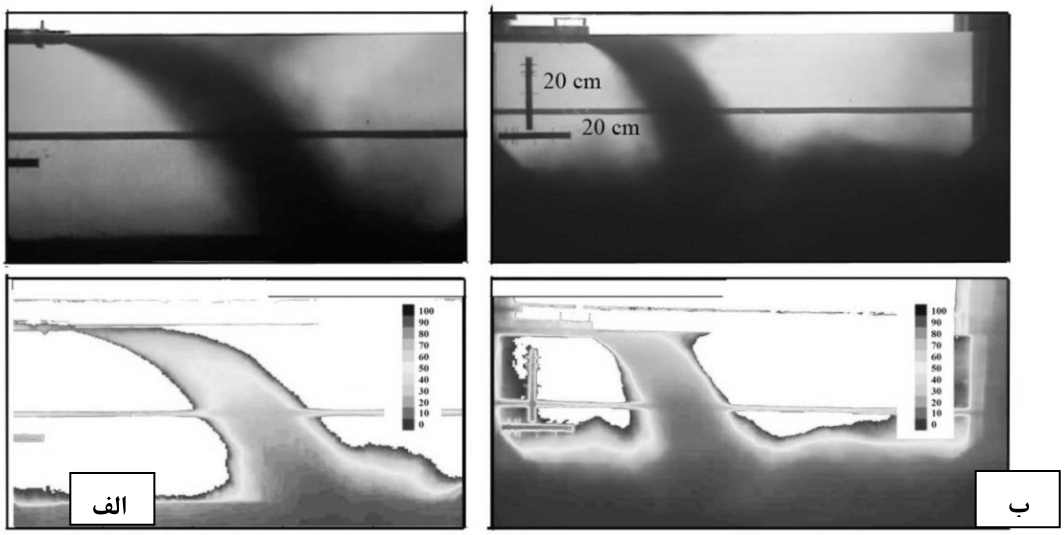
و) $u_0 = 29.96$ cm/s , $\rho_0 = 1.055$ gr/cm^3 ز) $u_0 = 33.8$ cm/s , $\rho_0 = 1.055$ gr/cm^3

مشاهدات کلی

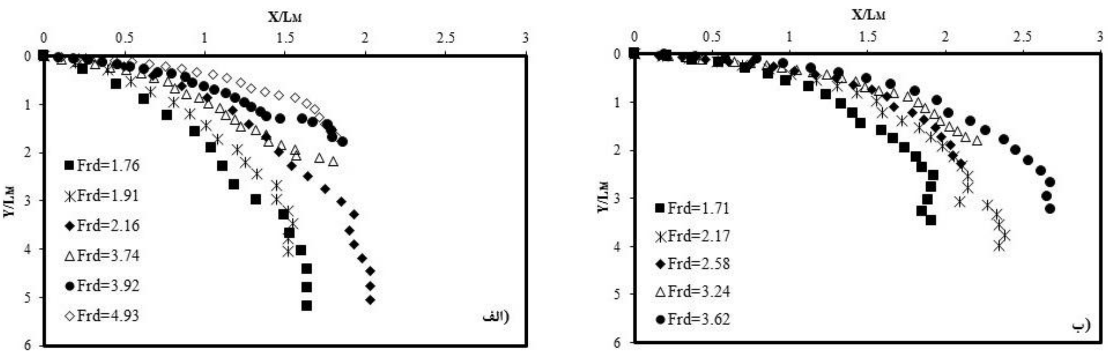
در ابتدا یک‌سری مشاهدات کلی از روند آزمایش ارائه گردیده است. در شکل شمارهٔ (۱) مسیر حرکت جت خروجی از تخلیه‌کنندهٔ سطحی مستطیلی در قالب سه اندازهٔ حرکت و دو شوری متفاوت نشان شده است. مشاهده می‌گردد که افزایش مومنتم خروجی در تخلیهٔ سطحی این فاضلاب‌ها، افزایش پیشرفت افقی جت خروجی در محیط را به‌دنبال خواهد داشت. افزایش چگالی فاضلاب در تخلیهٔ سطحی، منجر به کاهش طول نقطهٔ سقوط و وقوع زودهنگام آن می‌گردد.

الگوی جریان

در تخلیهٔ سطحی فاضلاب‌های سنگین، جریان خروجی با ورود به محیط به دلیل شناوری منفی خود به‌تدریج به‌سمت اعماق بیشتر متمایل می‌گردد. در این حالت جریان خروجی درصورت وجود لایه‌بندی حرارتی تا رسیدن به عمقی با چگالی برابر به حرکت پایین‌روندهٔ خود ادامه می‌دهد، اما در محیط‌های همگن به‌دلیل عدم وجود اختلاف چگالی در راستای عمق، حرکت پایین‌روندهٔ جریان تا رسیدن به کف محیط ادامه خواهد یافت. با برخورد جریان به بستر، جریان شکل‌گرفته تحت تأثیر شیب محیط به تدریج به حرکت درمی‌آید و میدانی از آلودگی در مجاورت آن ایجاد خواهد نمود. الگوی عمومی جریانات سطحی فاضلاب‌های سنگین در محیط‌های ساکن از دو مقطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای به‌صورت شکل (۲) ترسیم گردیده است. همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌گردد، مقایسهٔ الگوی جریان برای کانال با مقطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای نشان‌دهندهٔ این است که تخلیهٔ جریان برای هر یک از مقاطع، از الگوی مشابهی پیروی می‌کنند و شکل مقطع کانال تأثیری بر الگوی جریان در تخلیهٔ سطحی فاضلاب‌های سنگین ندارد.



شکل ۲ نمونه‌ای از تصاویر جانبی تخلیه پس از پردازش
تصویر بالا میانگین زمانی فریم‌های متوالی استخراج‌شده از فیلم‌های ضبط‌شده و تصویر پایین شدت نور تصویر میانگین‌گیری‌شده را نمایش می‌دهد؛ الف) مقطع ذوزنقه‌ای، ب) مقطع مستطیلی



شکل ۳ نتایج آزمایش‌های مختلف در ارتباط با مسیر حرکت جریان سطحی فاضلاب‌های سنگین در محیط‌های ساکن؛ الف) کانال با مقطع مستطیلی، ب) کانال با مقطع ذوزنقه‌ای

مسیر حرکت جریان

در این مطالعه به‌منظور تعیین مسیر حرکت جریان فاضلاب در محیط، موقعیت خط مرکزی جریان، ازطریق تعیین موقعیت نقاطی با حداکثر غلظت در برش‌های عرضی متفاوت از جریان انتخاب گردید. با اتصال این نقاط، خط مرکزی جریان برای هریک از آزمایش‌ها در حالتی که نسبت به مقیاس طولی جت به پلوم نرمال شده‌اند به‌دست‌آمد، مسیر حرکت جریان برای هریک از مقاطع در شکل (۳) ترسیم گردیده است. از آنجا که در این مطالعه $(Fr_d \leq 20)$بررسی شده است، براساس آزمایش‌های رابرتز و و همکاران [18] اثرات شار حجمی منبع قابل ملاحظه خواهد بود و نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد و درنتیجه خاصیت خودهمسانی جریان برقرار نیست و الگوی عمومی رفتار جریان در محیط به پارامترهای تخلیه وابسته است. در این نمودار سطح آب به‌عنوان مبدأ درنظر گرفته‌شده، محور افقی آن، مختصات افقی و محور عمودی، مختصات عمودی مسیر حرکت جریان را نشان می‌دهد

که توسط مقیاس طولی جت به پلوم بی‌بعد گردیده‌اند. نتیجهٔ به‌دست‌آمده از این نمودارها حاکی از آن است که در هر یک از دو مقطع با افزایش عدد فرود چگال (Densimetric Froude Number) (Fr_d)، پیشروی افقی (X) در امتداد مسیر حرکت جریان افزایش می‌یابد. این روند (رابطهٔ بین عدد فرود و میزان پیشروی افقی) در مطالعهٔ میکاس و پاپانیکولا [47] نیز مشاهده می‌شود. از مقایسهٔ مسیر حرکت جریان برای دو مقطع مشاهده می‌گردد که مقطع ذوزنقه‌ای نسبت به مقطع مستطیلی دارای پیشروی افقی و مسیر حرکت طولانی‌تری می‌باشد. علت این امر را می‌توان شیب بیشتر مسیر حرکت جریان در مقطع مستطیلی نسبت به مقطع ذوزنقه‌ای عنوان نمود، به‌عبارت دیگر در امتداد مسیر جریان (در امتداد X)، جریان از کانال با مقطع مستطیلی با سرعت بیشتری نسبت به کانال با مقطع ذوزنقه‌ای سقوط می‌کند. از این‌رو، در تخلیهٔ پساب‌های چگال از کانال با مقطع ذوزنقه‌ای، پساب پیش از برخورد با بستر دریا، مسیر طولانی‌تری را طی کند و از فرصت کافی برای اختلاط با آب محیط‌پذیرنده و دست یافتن به رقت مناسب بهره‌مند گردد.

باتوجه به الگوی تقریبا مشابه رفتار جریان در این حالت با تخلیهٔ افقی فاضلاب‌های سبک در حالت مستغرق (با درنظر گرفتن خاصیت آیینه‌گون حرکت)، نتایج به‌دست‌آمده از مطالعهٔ حاضر با نتایج حالات مشابه در حالت مستغرق (به‌طور معکوس) مقایسه گردیده است. در تخلیهٔ مستغرق فاضلاب‌های سبک، جت خروجی بعد از تخلیه با طی بخشی از مسیر به‌صورت افقی به‌دلیل شناوری مثبت خود به‌تدریج به‌سمت سطح منحرف می‌گردد. در محیط‌های همگن این حرکت تا رسیدن سیال به سطح آب ادامه پیدا می‌کند و بعد از آن جریان بر اثر پخشیدگی ناشی از شناوری در مجاورت سطح گسترش می‌یابد. در تخلیهٔ سطحی فاضلاب‌های سنگین جریان خروجی رفتاری مشابه اما درجهت عکس خواهد داشت. در شکل (٤) الگوی حرکت جریان در تخلیهٔ سطحی فاضلاب‌های سنگین ترسیم گردیده است. در این شکل نتایج مطالعات آزمایشگاهی فن [48]، دیویدسون و پن [49]، میکاس و پاپانیکولا [47] و شائو و همکاران [46] روی تخلیهٔ مستغرق فاضلاب‌های سبک همراه با نتایج مطالعهٔ حاضر (به‌صورت معکوس) ترسیم شده است. در این مطالعات از مقطع دایره‌ای استفاده شده است. محدودهٔ عدد فرود این مطالعات بزرگ‌تر از بیست است و از محدودهٔ عدد فرود مطالعهٔ حاضر ($Fr_d = 1.7-5$) بزرگ‌تر است؛ لذا در مطالعات مذکور از مقیاس طولی تخلیه (L_Q) صرف‌نظر شده است. به‌عبارت دیگر اثر شکل مقطع تخلیه ناچیز خواهد بود و در این مطالعات اثر شکل مقطع تخلیه دیده نشده است. همان‌طور که از شکل (٤) مشاهده می‌گردد، علی‌رغم بی‌بعدسازی نسبت به L_M، ($L_M \propto Fr_d$)، جریان رفتار خود-همسانی (self-similarity) ندارد و تراژکتوری‌ها در تمام گراف‌های شکل (٤) روی هم قرار نگرفته‌اند. از آنجا که در این مطالعه عدد فرود کوچک‌تر از بیست است ($Fr_d = 1.7-5$)، طبق مطالعات رابرتز و همکاران [18]، مقیاس طولی تخلیه (L_Q) قابل صرف‌نظر کردن نخواهد بود. به‌عبارت دیگر هندسهٔ کانال تخلیه مشخصات جریان تأثیرگذار خواهد بود و جریان خاصیت خود-همسانی نخواهد داشت. از این‌رو، مسیر حرکت هر یک از مقاطع روی هم قرار نمی‌گیرد.

علی‌رغم الگوی حرکت مشابه جریان‌های سطحی فاضلاب‌های سنگین با جریان‌های مستغرق فاضلاب‌های سبک، در شکل (٤) مشاهده می‌شود که مسیر حرکت این دو جریان کاملا بر یکدیگر منطبق نمی‌باشد. عدم تطابق کامل مسیر جریان در این دو حالت را می‌توان ناشی از تأثیرات سطح آزاد آب در تغییر الگوی عمومی حرکت جریانات سطحی دانست.

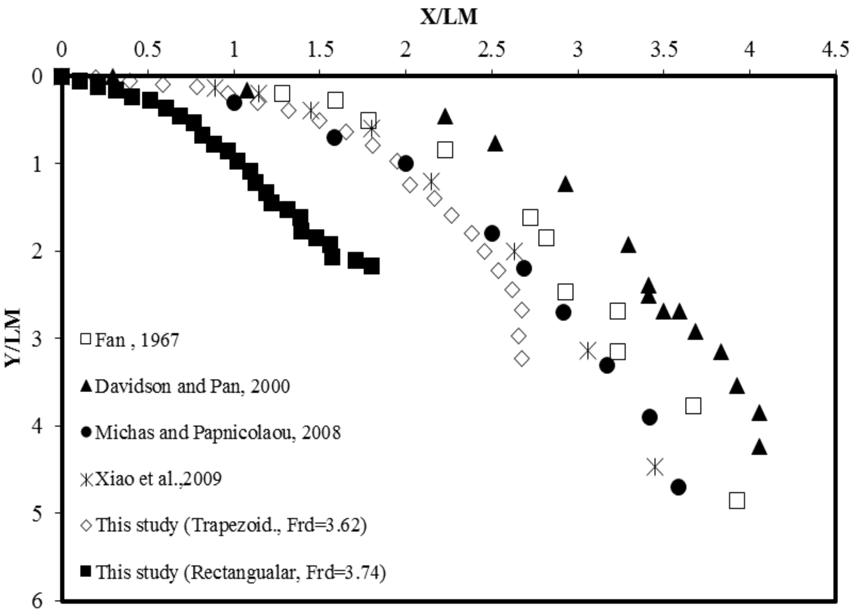
بااستفاده از آنالیز ابعادی ارائه‌شده در بخش (٣)، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مسیر حرکت جریان به‌صورت زیر ارائه گردیده است:

$$\frac{X}{L_M} = \alpha (Fr_d)^{\beta} + \gamma \left(\frac{y}{L_M} \right)^{\delta} \qquad (6)$$

به‌منظور تعیین ضرایب $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ و درنهایت استخراج رابطهٔ بی‌بعدی برای پیش‌بینی مسیر حرکت جریان، داده‌ها به دو دسته تقسیم شدند. دستهٔ اول ٪۸۰ داده‌ها هستند که تحت عنوان داده‌های آموزش (Training set) و دستهٔ دوم ٪۲۰ داده‌ها هستند که به‌عنوان داده‌های تست (Test set) نام‌گذاری گردیدند. انتخاب داده‌های تست به‌صورت تصادفی بوده است. از دسته اول برای بدست آوردن ضرایب روابط غیرخطی و از دستهٔ دوم داده‌ها برای اعتبارسنجی این روابط استفاده گردیده است. برای تعیین ضرایب موجود بااستفاده از داده‌های آموزش، از آنالیز رگرسیونی غیرخطی استفاده گردیده است که برای این کار از نرم‌افزار LAB Fit استفاده شده است. با جای‌گذاری ضرایب به‌دست‌آمده شکل نهایی این رابطه برای پیش‌بینی مسیر حرکت جریان به‌صورت سادهٔ زیر به‌دست آمده است:

$$\frac{X}{L_M} = 1.94 Exp\left(-0.78 \frac{y}{L_M} \right) + 1.47 Exp(0.09 Fr_d) \qquad (7)$$

مقادیر ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبین (R^2) برای داده‌های آموزش و تست به‌دست آمدند که در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ٤ بررسی مقایسه‌ای مسیر حرکت جریان در تخلیهٔ سطحی فاضلاب‌های سنگین نسبت به تخلیهٔ مستغرق فاضلاب‌های سبک

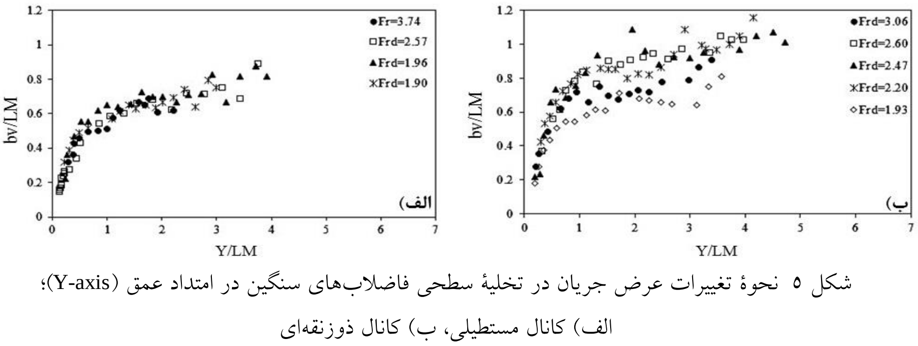
جدول ۲ صحت‌سنجی رابطهٔ ارائه‌شده

پارامترهای صحت‌سنجی	$\frac{X}{L_M}$	
	آموزش	تست
R^2	۰/۹۱	۰/۹
RMSE	۰/۱۵۷	۰/۱۱۲

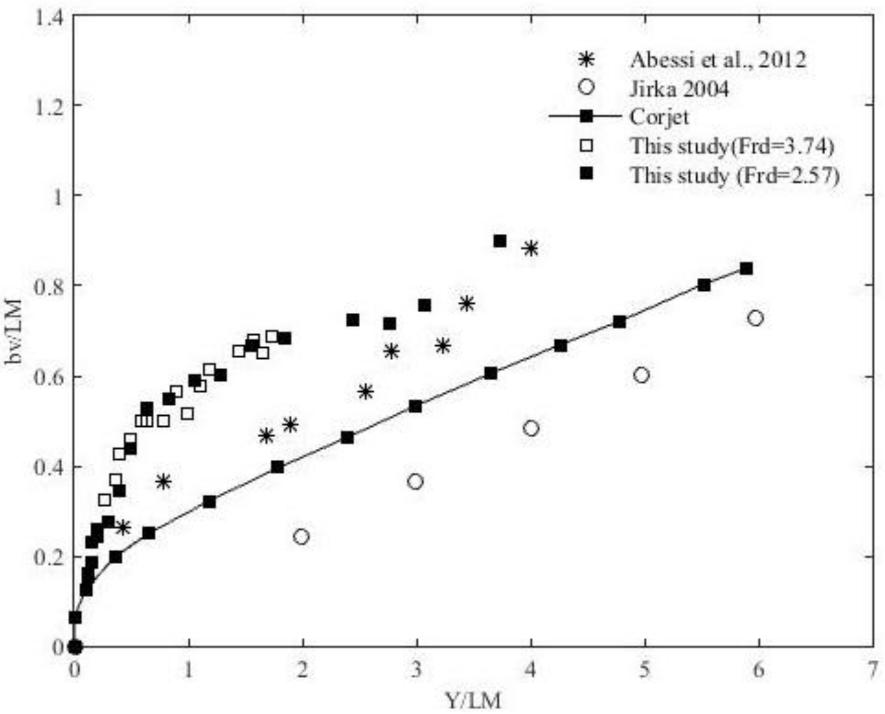
تغییرات عرض جریان در طول مسیر

جریان فاضلاب به‌محض ورود به محیط‌پذیرنده، با کشیدن آب محیط به داخل خود افزایش حجم می‌یابد و در جهات مختلف گسترش پیدا می‌کند. در این مطالعه با درنظر گرفتن عرض جریان به‌صورت فاصله‌ای که شدت نور سیاه برابر 1/e یا ۳۷٪ شدت نور ماکزیمم ($I(b_v)=1/eImax$) باشد به‌عنوان پهنای جریان در برش‌های عرضی مختلف تعیین گردیده است [۵۰]. با محاسبهٔ عرض جریان در هر مقطع (b_v) و موقعیت عمودی آن نسبت به سطح آب (Y) و درنهایت با نرمال نمودن مشخصات جریان بااستفاده از مقیاس طولی جت به پلوم (L_M) تغییرات عرض جریان در راستای عمق در آزمایش‌های مختلف برای کانال‌های مستطیلی و ذوزنقه‌ای به‌صورت شکل (۵) ترسیم گردیده است. همان‌طور که از شکل (۵) ملاحظه می‌گردد، روند تغییرات عرض جریان در هر دو مقطع، در امتداد عمق مشابه می‌باشد. به‌عبارت دیگر در هر دو مقطع عرض جریان در امتداد عمق افزایش می‌یابد. همان‌طور که از نمودارها مشهود است تغییرات عرض در امتداد عمق و همچنین نوسان آن برای مقطع ذوزنقه‌ای بیشتر از مقطع مستطیلی می‌باشد.

درادامه با شبیه‌سازی عددی برخی از آزمایش‌های انجام‌گرفته در مدل کرجت، نتایج آزمایشگاهی حاضر با نتایج به‌دست‌آمده برای حالت تخلیهٔ افقی فاضلاب‌های سبک از تخلیه‌کنندهٔ مستغرق، مقایسه گردیده است. قابل ذکر است که این مدل بر مبنای روش انتگرالی اویلری که در آن حجم کنترل ثابت درنظرگرفته شده است اقدام به شبیه‌سازی جریان تخلیه‌شونده از تخلیه‌کننده‌ها می‌نماید. این مدل در آخرین نسخهٔ خود (CorJet v5.0) قادر به شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان به‌منظور پیش‌بینی رفتار و مسیر حرکت جت‌های با شناور مثبت، منفی و خنثای تخلیه‌شونده از تخلیه‌کننده‌های مستغرق تک‌مجرایی و چندمجرایی می‌باشد. در شکل (٦) نتایج با رابطهٔ $b_v=0.12Y$ [15] برای برآورد نرخ تغییرات عمقی عرض جریان در پلوم‌های مستغرق شناور مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (٦) ملاحظه می‌گردد نتایج به‌دست‌آمده، از مدل و الگوی برازش‌شده توسط ژیرکا [15] پیروی می‌کنند. علی‌رغم روند مشابه تغییرات غلظت جریان در راستای عمق، رابطهٔ خطی برازش‌شده بر داده‌های آزمایشگاهی، دارای یک تفاوت جزئی در شیب خط فوق با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های تحلیلی می‌باشد. عابسی و همکاران در مطالعات خود شیب این خط را ۰/۱۲٤ گزارش نمودند، در حالی‌که در این آزمایش‌ها شیب افزایش عرض جریان برابر با ۰/۱۲٦ به‌دست آمده است ($b_v=0.126Y$) که کمی بیشتر از نرخ ارائه‌شده توسط ژیرکا [15] و عابسی و همکاران [29] می‌باشد. این تفاوت جزئی با مدل تحلیلی و مطالعات آزمایشگاهی عابسی و همکاران به‌ترتیب به‌دلیل فرضیات ساده‌شوندهٔ مدل و خطای آزمایشگاهی است. البته همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد، تغییرات عرض در طول مسیر در مطالعهٔ حاضر، ابتدا مانند مدل کرجت یک روند صعودی سریع داشته است و سپس با شیب کمتر و تقریبا به‌صورت خطی افزایش یافته است.



شکل ۵ نحوهٔ تغییرات عرض جریان در تخلیهٔ سطحی فاضلاب‌های سنگین در امتداد عمق (Y-axis)؛
الف) کانال مستطیلی، ب) کانال ذوزنقه‌ای



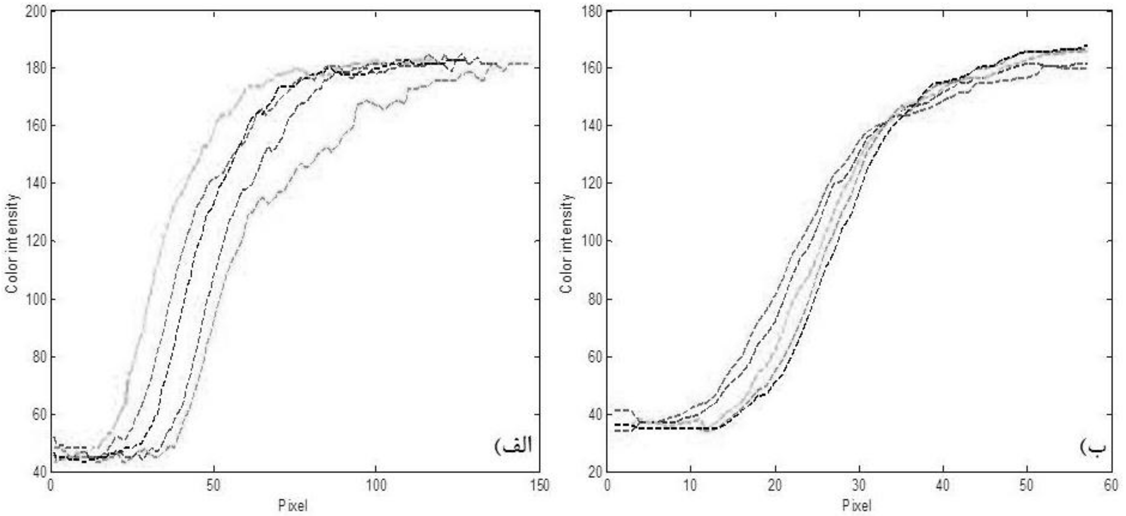
شکل ٦ بررسی مقایسه‌ای تغییرات عرض جریان‌های سطحی فاضلاب‌های سنگین در راستای عمق با پیش‌بینی‌های مدل کرجت و ژیرکا [15]

پروفیل غلظت

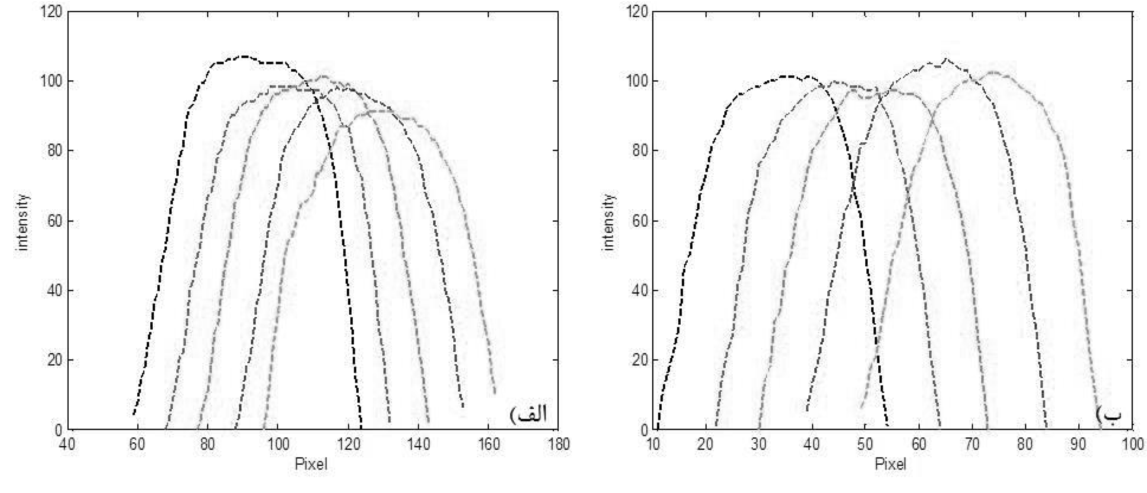
در این پژوهش به‌منظور بررسی پروفیل‌های غلظت جریان در جهات مختلف، شدت نور سیاه در برش‌های عرضی مختلف عمود بر خط مرکزی جریان برای هر دو مقطع مستطیل و ذوزنقه استخراج گردید و به‌منظور تعیین عرض جریان تعریف‌شده توسط لی و چو [50] مورد استفاده قرار گرفت و نقطه‌ای با ۳۷ درصد غلظت بیشبیه از خط مرکزی جریان $(I(b_v)) = \frac{1}{e} I_{max}$ به‌عنوان عرض جریان درنظر گرفته شد. در تخلیه‌کنندهٔ سطحی، پروفیل غلظت در ناحیهٔ جت‌شکل (جریان در تماس با سطح آب) به‌صورت نیم‌گوسی و در ناحیهٔ پلوم‌شکل (محدودهٔ مستغرق جریان) به‌صورت تمام‌گوسی است. در شکل (۷) پروفیل‌های غلظت جریان در امتداد ناحیه‌ای به‌شکل جت در صفحهٔ X-Y برای آزمایش (۱) مقطع مستطیل با مشخصات $U_0 = 23 m/s$، $\rho_0 = 1.034 g/cm^3$، $h_0 = 0.8 cm$، $b_0 = 10 cm$ و $H = 60.8 cm$ (cm) و آزمایش(۹) مقطع ذوزنقه با مشخصات $U_0 = 22.5 m/s$، $\rho_0 = 1.024 g/cm^3$، $h_0 = 0.9 cm$ ، $b_0 = 10 cm$ و $H = 60.9 cm$ ترسیم گردیده است. در این شکل محور عمودی شدت نور سیاه و محور افقی نقاط تصویر میانگین آزمایش در امتداد مقطع برداشت شده از جریان می‌باشند و مشخصات پروفیل‌های ترسیم‌شده تغییرات زنگوله‌ای غلظت جریان درجهت عرض پلوم را برای هر دو مقطع نشان می‌دهند. در هر یک از مقاطع، عدم انطباق این پروفیل‌ها بر روی یکدیگر و عرض غیر مساوی آنها به‌دلیل فواصل متفاوت برش‌های فوق از منبع تخلیه و گسترش عرضی جریان در امتداد مسیر آن می‌باشد.

در شکل (۸) نیز پروفیل‌های گوسی به‌دست‌آمده برای غلظت جریان در مقاطع عرضی مختلف آزمایش (٤) مقطع مستطیل با مشخصات $U_0 = 29.3 m/s$، $\rho_0 = 1.034 g/cm^3$، $h_0 = 2 cm$ ، $b_0 = 10 cm$ و $H = 62 cm$ و در آزمایش (۸) مشخصات $U_0 = 24.5 m/s$، $\rho_0 = 1.034 g/cm^3$، $h_0 = 0.7 cm$ ، $b_0 = 10 cm$ $H = 60.7 cm$ نشان داده شده است.

مشخصات محورها در این شکل نیز مانند شکل (۷) می‌باشد. پروفیل‌های جریان در ناحیهٔ پلوم‌شکل از یک الگوی تمام‌گوسی پیروی می‌کنند. همان‌طور که از شکل‌های (۷) و (۸) مشهود است، پروفیل‌های نیمه‌گوسی غلظت جریان در محدودهٔ جت‌شکل جریان و پروفیل‌های گوسی غلظت در ناحیهٔ پلوم‌شکل جریان برای هر دو مقطع مشابه می‌باشند. این موضوع بیانگر این است که شکل مقطع کانال بر پروفیل‌های نیمه‌گوسی غلظت جریان در ناحیهٔ جت‌شکل و نیز پروفیل‌های تمام‌گوسی غلظت جریان در ناحیهٔ پلوم‌شکل جریان چگال تأثیری ندارد.



شکل ۷ پروفیل نیمه‌گوسی غلظت جریان در برش‌های عمودی از ناحیهٔ جت‌شکل جریان؛ الف) در آزمایش شمارهٔ ۱ (کانال مستطیلی)، ب) آزمایش شمارهٔ ۹ (کانال ذوزنقه‌ای)



شکل ۸ پروفیل تمام‌گوسی غلظت در ناحیهٔ پلوم‌شکل جریانات سطحی فاضلاب‌های سنگین؛ الف) در آزمایش شمارهٔ ٤ (کانال مستطیل)، ب) در آزمایش شمارهٔ ۸ (کانال ذوزنقه‌ای)

نتیجه‌گیری

در مطالعهٔ حاضر، اثر شکل هندسی منبع تخلیه بر رفتار جریان در تخلیهٔ سطحی پساب‌های چگال در محیط ساکن و لایه‌بندی‌نشده، از طریق شبیه‌سازی فرایند تخلیه در محیط آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. الگوی جریان، مسیر حرکت، تغییرات عرض در طول مسیر و پروفیل غلظت جریان برای هریک از مقاطع مستطیل و ذوزنقه ازجمله پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش به‌شمار می‌روند. نتایج مشاهدات انجام‌شده از طریق بی‌بعدسازی پارامترهای حاکم به‌روش مقیاس طولی، درنهایت در قالب مجموعه‌ای از روابط و نمودارهای بی‌بعد ارائه گردید. مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده برای دو مقطع بیانگر این واقعیت است که، در فرودهای کوچک شکل کانال بر مشخصات هندسی و اختلاطی جریان چگال تأثیر دارد و این تأثیر بدین‌گونه است که هرچه شکل کانال تخلیه‌کننده به شکل بهترین مقطع هیدرولیکی (نیم‌دایره) نزدیک‌تر باشد شیب مسیر حرکت کمتر و درنتیجه مسیر حرکت طولانی‌تر و سقوط جریان چگال از آن آهسته‌تر خواهد بود. بنابراین جریان پیش از برخورد به بستر محیط‌پذیرنده از فرصت کافی برای اختلاط با سیال محیطی برخوردار می‌گردد و آلودگی کمتری در محیط زیست دریایی ایجاد می‌گردد. از این‌رو، پیش‌بینی می‌شود هرچه شکل کانال به شکل بهترین مقطع هیدرولیکی نزدیک‌تر باشد از مشخصات اختلاطی بهتری برخوردار خواهد بود. این نتایج به‌همراه مجموعه نمودارها و روابط بی‌بعد به‌دست‌آمده در این مطالعه، امکان پیش‌بینی مشخصات جریان و طراحی نمونه‌های واقعی از این تخلیه‌کننده‌ها را به‌نحو مطلوبی فراهم می‌آورد.

سپاس‌گزاری

به این وسیله از حمایت‌های دانشگاه تربیت مدرس و علم و صنعت ایران بابت فراهم‌سازی زیرساخت‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در مطالعهٔ حاضر تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. Crowe, A.T., Davidson, M.J., Nokes, R.I., "Maximum Eight and Return Point Velocities of Desalination Brine Discharges", *18th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston*, Australia, (2012).
2. Global Water Intelligence Editorial Team. ed., Desalination markets: 2005–2015. Media Analytics Ltd, Oxford, UK, (2004).
3. Lattemann,S., Kennedy, M.D., Schippers, J.C., Amy G., Global Desalination Situation, Sustainability Sci. Eng. 2, http://dx.doi.org/10.1016/S1871-2711(0900202-5), (2010).
4. Oliver, C.J., Davidson, M.J., Nokes, R.I., "Predicting the Near-field Mixing of Desalination Discharges in a Stationary Environment", *J. Desalination*, Vol. 309, PP. 148-155, (2013).
5. Sajwani AA, The desalination plants of oman: past, present, and future. Desalination 120:53–59, (1998).
6. Gameson, A. L. H. Bacterial mortality, Part 1, in investigation of sewage discharge to some British coastal waters, Chapter 8mWRc Technical report TR 201, Medmenham, U.K, (1984).
7. USEPA. Ambient water quality criteria, EPA 440/5-80-015 to 079, U.S. Environmental Protection

Agency, Washington, D.C, (1980a).

8. USEPA. Dilution models for effluent discharges, Office of Research and development, EPA/600/R-94/086, Environmental Protection Agency, Washington, D.C, (1994).
9. Kikkert, Gustaaf. A., "Buoyant Jets with Tow and Three-dimensional Trajectories, Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, (2006).
10. Shao, D., Law, A.W.K., "Mixing and Boundary Interactions of 30° and 45° Inclined Dense Jets", J. Environmental Fluid Mechanics, Vol. 10, No. 5, PP. 521-553, (2010).
11. Jones, G., Nash, D., Doneker, L., and Jirka, G.H., "Buoyant Surface Discharge into Water Bodies. I: Flow Classification and Prediction Methodology", J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 133, No. 9, PP. 1010-1020, (2007).
12. Baines, W.D., Turner, J.S., Campbell, I.H., "Turbulent Fountains in an Open Chamber", J. Fluid Mech, Vol. 212, PP. 557-592, (1990).
13. Bleninger, T. and Jirka, G., "Modelling and Environmentally Sound Management of Brine Discharges from Desalination Plants", *J. Desalination.* Vol. 221, PP. 585–597, (2008).
14. Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F., Nicosia, S., "Bench-scale Investigation of Inclined Dense Jets", *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 131, No. 11, PP. 1017-1022, (2005).
15. Jirka, G.H., "Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows Part 1: Single Round Jet", *J. Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 4, PP. 1-56, (2004).
16. Kikkert, Gustaaf. A., "Buoyant Jets with Tow and Three-dimensional Trajectories", Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, (2006).
17. McLellan, T.N. and Randall, R.E., "Measurement of Brine Jet Height and Dilution", *J. Water.*, Port, Coastal, Ocean Eng., Vol. 112, No. 2, PP. 200-216, (1986).
18. Roberts, P.J.W., Ferrier, A., and Daviero, G., "Mixing in Inclined Dense Jets", *J. Hydraulic Engineering*, Vol. 123, No. 8, PP. 693-699, (1997).
19. Oliver, C.J., Davidson, M.J., Nokes, R.I., "Predicting the Near-field Mixing of Desalination Discharges in a Stationary Environment", *J. Desalination*, Vol. 309, PP. 148-155, (2013).
20. Zhang, H., Baddour, E., "Maximum Penetration of Vertical Round Dense Jets at Small and Large Froud Numbers", *J. Hydr. Eng.* Vol. 124, No. 5, PP. 550-553, (1998).
21. Doneker RL, Jirka GH., "CORMIX-GI Systems for Mixing Zone Analysis of Brine Waste Water Disposal", Desalination, Vol. 139, PP. 263–274, (2001).
22. Amon, R.M.W., Benner, R., "Seasonal Patterns of Bacterial Abundance and Production in the Mississippi River Plume and Their Importance for the Fate of Enhanced Primary Production", FEMS Microbiol, Ecol. Vol. 35, No. 3, PP. 289-300, (1998).
23. Chu, V.H. and Jirka, G.H., "Surface Buoyant Bets. Encyclopedia of Fluid Mechanics", Chap. 25,

Gulf, Houston, (1986).

24. Jirka, G.H., "Buoyant Surface Discharges into Water Bodies", II: jet integral model. J. Hydr. Eng. Vol. 133, No. 9, PP. 1021-1036, (2007a).
25. Nash, J.D., Jirka, G.H., "Buoyant Surface Discharges into Unsteady Ambient Flows", *J. Dyn. Atmos.* Oceans 24 (1-4), PP. 75-84, (1996).
26. Gholamreza-Kashi, S., Martinuzzi, R.J., Baddour, R.E., "Mean Flow Field of a Nonbuoyant Rectangular Surface Jet", *J. Hydraulic Engineering,* Vol. 133, No. 2, PP. 234-239, (2007).
27. Kassem, J.A.M., and Khan, J.A., “Three-Dimensional Modeling of Negatively Buoyant Flow in Diverting Channels", *J. Hydraulic Engineering,* Vol. 129, No. 12, PP. 936-947, (2003).
28. Law Adrian W.K., Fun Ho W., and Monismith, S.G., "Double Diffusive Effect on Desalination Discharges", *J. Hydraulic Engineering,* Vol. 130, No. 5, PP. 450-457, (2004).
29. Abessi, O., Saeedi, M., Bleninger, T., Davidson, M., "Surface Discharge of Negatively Effluent in Unstratified Stagnant Water", *J. Hyro-Environ.* Res. Vol., 6, PP. 181-193, (2012).
30. Davidson M.J., Wang Y. and Pun K.L., A Lwngth-Scale Model for Merging of Jet in a Coflow. *J Engineering Mechanics,* PP. 215-218, (1995).
31. Jirka, G. H., User’s manual for CORMIX: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. DeFrees Hydraulics Laboratory, Cornell University, Ithaca, N.Y, (1996).
32. Roberts, P. J. W, Snyder, W.H and Baumgartner D.J., "Ocean Outfalls. I: Submerged Wastfield Formation", *J. Hydro. Eng.,* ASCE, 115(1), PP. 49-69, (1989).
33. Roberts, P. J. W, Snyder, W.H. and Baumgartner, D.J., "Ocean Outfalls. II: Soatial Evolution of Submerged Wastfield", *J. Hydr. Eng.,* ASCE, 115(1), PP. 26-47, (1989).
34. Roberts, P. J. W, Snyder, W.H. and Baumgartner, D.J., "Ocean Outfalls. III: Effect of Diffuser Design on Submerged Waste Field", *J. Hydr.* Eng., ASCE, 115(1), 1-25.34, (1989).
35. Tian, X., Roberts P.J.W and Daviro, J., "Marin Waste Water Discharge from Multiport Diffusers", IV: stratified flowing water. *J. Hydr. Eng.,* ASCE, 132(4), PP. 411-419, (2006).
36. Chu, V.H. and Goldberg, M.B., "Buoyant Forced-plumes in Cross flow", *J. Hyd. Div.,* ASCE, 100(HY9), 1203-1214, (1974).
37. Wood, I. R. and Bell. R. G. and Wilkinson D.L., "Ocean Disposal of Wastewater", Advance series on ocean engineering, Book, volume 8, (1993).
38. Davidson, M.J., "The Behavior of Single and Multiple", horizontally discharged, buoyant flows in a non-turbulent co flowing ambient fluid. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand, (1989).
39. Lee, J. H. W. and Cheung, V., "Generalized Lagrangian Model for Buoyant Jets in Current", *Journal*

of Environmental Engineering, ASCE, 116(6), PP. 1085-1105, (1990).

40. Baumgartner, D. J., Frick W. E. and Roberts, P. J. W., "Dilution Models for Effluent Discharges (Second Edition)", June 11, 1993. U.S. EPA. Washington, D.C. EPA Report #600/R-93/139. 181, (1993).

۴۱. غفاریان‌روح پرور، ح.، فغفور مغربی، م. و نصیریان، ع.، «برآورد دانه‌بندی و نحوهٔ گسترش ر سوب در مق طع خرو جی و کف حو ضچهٔ ته‌نشینی بااستفاده از مدل اولری- لاگرانژی»، نشریهٔ مهندسی عمران و محیط زیست تبریز، ج. ۴۲، ش. ۳، (۱۳۹۱).

42. Miller, R.S., Madnia, C. K. and Givit, P., "Numerical Simulation of Non-circular Jets", *J. Computers and Fluids.* Vol. 24, No. 1, PP. 1-25, (1995).

43. Nokes, R., Image Stream Version 7.00, User's Guide, Department of civil and Natural Resources Engineering University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, (2008).

44. Jirka, G.H., Adams, E.E., and Stolzenbach, K.D., "Buoyant Surface Jets", *J. Hydr. Div.,* Vol. 107, No. 11, PP. 1467-1487, (1981).

45. Jones, G.R., Nash, J.D., and Jirka, G.H., "CORMIX3: An Expert System for Mixing Zone Analysis and Prediction of Buoyant Surface Discharge", DeFrees Hydraulics Laboratory, Cornell University, (1996).

46. Xiao, J., Travis, J.R. and Breitung, W., 2009. Non-Boussinesq Integral Model for Horizontal Turbulent Buoyant Round Jets. Science and Technology of Nuclear Installations, doi:10.1155/2009/862934.

47. Michas, S.N., Papnicolaou, P.N., "Horizontal Round Heated Jets into Calm Uniform Ambient", *J. Desalination.* Vol. 248, PP. 803-815, (2009).

48. Fan, L.N., "Turbulent Buoyant Jets into Stratified or Flowing Ambient Fluids", KH-R-15, W.M. Keck Laboratory of Hydraulic and Water Resource, California Institute of Technology, Pasadena, California, (1967).

49. Davidson, M.J., and Pun, K.L., "Location Discharge Trajectories in Still and Moving Ambient Fluids", *J. Hydr.* Eng. Vol. 126, No. 7, PP. 513-524, (2000).

50. Lee, J.H.W. and Chu, V.H., "Turbulent Jets and Plumes a Lagrangian Approach", Kluweer Academic Publishers, Boston, (2003).